



Directive

Sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse



valable dès: 01.10.2012
actualisée: 01.04.2015

Impressum

Editeur : Inspection fédérale des installations à courant fort ESTI, 8320 Fehraltorf
Office fédéral des transports, 3003 Bern

Auteur : Martin Koller (Résonance Ingénieurs-Conseils SA)
Co-auteur : Sven Heunert (Office fédéral de l'environnement OFEV)
sous collaboration de : Axpo, OFT, ESTI, ewz, IWB et CFF

Nom du document : ESTI_248_0415_f (publié comme fichier pdf)

Téléchargement sous : www.esti.admin.ch Documentation – ESTI Publications
www.bav.admin.ch Prescriptions – Directives

Versions linguistiques : allemand (original)
français
italien

Cette directive est entrée en vigueur le 1er octobre 2012 et a été révisée au 1er décembre 2014 sous intégration du réseau 16,7 Hz dans le domaine des chemins de fer.

Inspection fédérale des installations
à courant fort

Office fédéral des transports
Division Sécurité

Dario Marty, Directeur

Pieter Zeilstra, Vice-directeur

Versions / Historique des modifications

| Version | Date | Auteur | Modification |
|---------|------------|--------------|----------------------------|
| V 1.0 | 01.10.2012 | Urs Huber | |
| V 1.1 | 15.04.2013 | Urs Huber | réductionnel |
| V 2.1 | 01.04.2015 | Sven Heunert | intégration chemins de fer |

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Avant-propos | 4 |
| 1. Introduction | 5 |
| 1.1 Objectif | 5 |
| 1.2 Domaine d'application | 5 |
| 1.3 Procédure d'approbation des plans | 6 |
| 2. Termes | 7 |
| 3. Action sismique | 9 |
| 3.1 Zones sismiques..... | 9 |
| 3.2 Classes de sol de fondation..... | 9 |
| 3.3 Classes d'ouvrages..... | 10 |
| 3.4 Coefficient de comportement q..... | 11 |
| 4. Dispositions pour la sécurité sismique de la technique des installations | 11 |
| 4.1 Sécurité sismique des transformateurs | 13 |
| 4.2 Sécurité sismique des appareils à haute tension..... | 15 |
| 4.3 Installations de la distribution d'énergie dans des armoires..... | 16 |
| 4.4 Connexions parasismiques..... | 17 |
| 4.5 Sécurité sismique des systèmes secondaires et autres équipements..... | 21 |
| 5. Dispositions pour la sécurité sismique des bâtiments | 22 |
| 6. Dispositions pour la sécurité sismique des lignes | 22 |
| 6.1 Lignes aériennes..... | 22 |
| 6.2 Câbles d'alimentation | 23 |
| 7. Recommandations pour les sous-stations existantes "importantes" | 23 |
| 8. Sources | 24 |
| Annexe A : Zones sismiques selon SIA 261 | 25 |
| Annexe B : Ancrage de transformateurs | 26 |
| Annexe C : Explications complémentaires relatives au besoin de mou | 29 |
| Annexe D : Feuille de calcul sismique | 30 |
| Annexe E : Exemples de sécurisation d'éléments non-structuraux | 37 |
| Annexe F: Convention d'utilisation | 39 |

Avant-propos

Les expériences à l'étranger montrent que, lors de forts séismes, il faut pratiquement toujours s'attendre à des pannes de courant locales et même souvent régionales durant plusieurs heures à quelques jours.

Les dommages de loin les plus graves provoqués à l'infrastructure de distribution d'énergie électrique sont observés dans les sous-stations (le terme sous-station englobe le terme poste) isolées à l'air, tandis que les sous-stations isolées au SF₆ ne sont généralement pas critiques. Les lignes aériennes également résistent bien aux tremblements de terre la plupart du temps. Plus le niveau de tension est élevé, plus les sous-stations isolées à l'air sont vulnérables. Les dommages récurrents dus aux séismes sont des ruptures d'éléments en porcelaine et des dommages causés à des transformateurs non ancrés ou insuffisamment ancrés. Les éléments en porcelaine se brisent souvent à la suite d'interactions défavorables quand les connexions par câbles entre des appareils voisins ne présentent pas de « mou » suffisant. Des chocs violents provoqués par du jeu dans les ancrages peuvent également provoquer des dégâts. Souvent aussi, des problèmes sont observés dans les systèmes secondaires, comme par exemple la chute de batteries de secours ou le renversement d'armoires de commande.

En Suisse, il faudrait s'attendre à des dégâts similaires en cas de séisme important. C'est pourquoi un groupe d'experts a remis au Conseil fédéral en 2004 un rapport sur la mitigation des séismes, dans lequel la distribution d'énergie électrique est citée comme l'un des secteurs prioritaires nécessitant des mesures concrètes.

De 2008 à 2010, la Centrale de coordination pour la mitigation des séismes de l'Office fédéral de l'environnement a mandaté une étude sur la vulnérabilité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse [1, 2]. Cette étude a été suivie par un groupe d'experts dans le domaine de la distribution d'énergie électrique. La présente directive se base sur les connaissances acquises par cette étude.

Depuis 2000, la Confédération exige que toutes les nouvelles constructions pour lesquelles une autorisation fédérale est nécessaire ou qu'elle subventionne soient conçues de façon parasismique selon les normes en vigueur. Pour les bâtiments et les ponts, il s'agit des normes sur les structures porteuses SIA 260 à 267 parues en 2003, et particulièrement de la norme SIA 261 [3]. Lors de transformations, la sécurité sismique doit être vérifiée et améliorée si besoin est, dans la mesure où les investissements se justifient.

Dans le domaine de la distribution d'énergie électrique dans la haute tension, il manquait jusqu'à présent les bases concrètes nécessaires permettant aux autorités de surveillance compétentes (ESTI resp. OFT) de faire appliquer la réglementation mentionnée. Les normes sur les structures porteuses SIA 260 à 267 contiennent, il est vrai, certaines indications pour les éléments de construction non porteurs et les installations. Mais celles-ci ne sont pas assez spécifiques pour une application concrète dans le domaine de la distribution d'énergie électrique. La présente directive de l'ESTI doit combler cette lacune ; elle se base sur les normes SIA pour les structures porteuses mentionnées, sur les normes internationales pertinentes de la branche de l'électricité ainsi que sur la publication de l'ASCE [4].

1. Introduction

1.1 Objectif

Le but de la présente directive est de réduire durablement, à des coûts si possible faibles, le risque d'un blackout étendu et de longue durée en cas de fort séisme, ainsi que de limiter les dommages directs aux éléments d'infrastructure. Pour cela, la vulnérabilité sismique de la distribution d'énergie électrique doit être réduite pas à pas, à chaque fois que l'occasion se présente.

La mise en œuvre concrète de mesures constructives efficaces et économiques, qui augmentent de manière notable la robustesse du système est plus importante que des calculs détaillés.

1.2 Domaine d'application

La présente directive est applicable aux constructions et installations de la distribution d'énergie, mais en général pas aux centrales électriques. Les installations électriques de production d'énergie font l'objet d'autres dispositions en rapport avec la sécurité sismique et ne rentrent donc pas dans le cadre de cette directive. Pour le domaine des chemins de fer la directive pour les installations de distribution du courant de traction est applicable selon l'annexe 4, chiffre b de l'ordonnance sur les chemins de fer (OCF).

Les dispositions de cette directive sont applicables partout en Suisse, dans toutes les zones sismiques ; elles sont applicables aux nouvelles installations ainsi qu'aux installations existantes lors de renouvellements. Le remplacement d'un appareil à haute tension avec maintien des fondations est considéré comme un renouvellement d'une installation existante. Le remplacement d'un transformateur par un transformateur neuf avec maintien des fondations est aussi considéré comme un renouvellement d'installation existante.

Ces dispositions sont valables en partie pour tous les niveaux de haute tension, en partie pour les tensions égales ou supérieures à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) seulement ; un aperçu du domaine d'application des dispositions est donné dans le tableau 1. Comme les appareils et connexions par câbles des tensions inférieures à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) résistent généralement bien aux séismes, même sans mesures parasismique lors de la construction, il est possible de renoncer à des prescriptions sismiques spéciales pour les appareils des niveaux de tension inférieurs à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz).

Lorsque les dispositions de la directive sont applicables pour des tensions de 220 kV ou supérieur pour le réseau 50 Hz, elles sont applicables pour le réseau 16,7 Hz déjà à partir d'une tension de 132 kV. Il y a deux raisons à cela : D'abord, le réseau 16,7 Hz est moins redondant que le réseau 50 Hz. De plus, les appareils à haute tension pour 16,7 Hz présentent en règle générale – à même tension – une masse et une taille plus élevée et sont par conséquent plus vulnérables que des appareils analogues 50 Hz.

Les dispositions pour transformateurs sont valables pour tous les transformateurs de la distribution d'énergie. Les transformateurs de groupe ou les transformateurs principaux d'installation de production ne rentrent pas dans le domaine d'application de cette directive dans la mesure où ils ne servent pas à des alimentations de se-

cours particulièrement importantes qui doivent résister en cas de séisme (comme par exemple l'alimentation de secours d'hôpitaux, d'aéroports nationaux, etc.).

La directive définit seulement pour les lignes aériennes les plus importantes des dispositions particulières, car ces lignes résistent généralement bien aux séismes.

Des dérogations par rapport à cette directive sont admises s'il peut être démontré de façon acceptable, par la théorie (p. ex. des méthodes de calcul approfondies) ou par des essais, qu'un niveau de sécurité équivalent en matière de séismes est atteint. De telles dérogations doivent faire l'objet de justifications et documentations suffisantes.

Le chapitre 7 comprend des recommandations pour les installations importantes existantes. La prise en compte de ces recommandations est facultative.

Tableau 1 : Constructions et installations dans le domaine d'application de la présente directive.

| Sécurité sismique de | Niveaux de tension |
|---|--|
| Transformateurs | Tous les niveaux de tension ^{1) 2)} |
| Appareils électriques | Tensions de 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) ou supérieures ¹⁾ |
| Installations de distribution d'énergie dans des armoires | Tous les niveaux de tension |
| Connexions par câbles (mou) | Tensions de 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) ou supérieures |
| Systèmes secondaires et autres installations | Tous les niveaux de tension |
| Bâtiments de la technique secondaire et des installations | Tous les niveaux de tension |
| Lignes aériennes | Tensions de 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) ou supérieures |
| Lignes en câbles | Tous les niveaux de tension |

¹⁾ tenir compte de la dépendance de la zone sismique (voir tab. 5 et tab. 7)

²⁾ tenir compte de la dépendance du degré d'élançement (voir tab. 5)

1.3 Procédure d'approbation des plans

Dans le cadre de la procédure d'approbation des plans, le requérant doit confirmer avant le début de la construction par écrit à l'autorité de contrôle (ESTI ou OFT) que les prescriptions de la présente directive seront entièrement respectées, sous réserve des dérogations autorisées. Pour les nouveaux bâtiments de sous-stations (le terme sous-station englobe le terme poste), il faut en plus remettre la convention d'utilisation selon la norme SIA 260 (paragraphe 2.2). L'annexe F montre quels aspects sont pertinents pour la sécurité sismique et doivent être définis dans la convention d'utilisation.

Pour les sous-stations dont la tension la plus haute est égal ou supérieur à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz), les feuilles de calcul (voir annexe D) ainsi que les esquisses de l'ancrage des transformateurs sont toujours à remettre. De plus, dans les zones sismiques Z2, Z3a ou Z3b les plans et les justificatifs de calcul pour l'ancrage des transformateurs ainsi que les certificats sont à remettre avant le début des travaux. D'autres documents peuvent être demandés par les autorités de surveillance au cas par cas pour un contrôle.

2. Termes

Accélération du plateau : Accélération maximale dans un spectre de réponse utilisée pour le dimensionnement antisismique.

Appareil à haute tension : Appareils électriques pour haute tension.

Classe de sol de fondation : Les mouvements du sol lors d'un tremblement de terre dépendent fortement de la nature du sol. La norme SIA 261 prend cela en compte approximativement, comme la plupart des normes parasismiques, en distinguant différentes classes de sol de fondation pour lesquelles elle définit différents spectres de réponse.

Classe d'ouvrage : Les ouvrages sont répartis par la norme SIA 261 en trois classes (CO) par rapport aux séismes. La CO I correspond aux ouvrages "ordinaires", la classe CO II aux ouvrages importants, p. ex. ceux avec fonction d'infrastructure importante, et la CO III aux ouvrages particulièrement importants, p. ex. ceux d'infrastructures ayant une fonction vitale, appelés aussi ouvrages "lifelines".

Facteur de participation : Facteur qui apparaît dans l'analyse modale (analyse dynamique). Là où il est mentionné dans la présente directive, il indique la différence de grandeur entre le déplacement aux points de raccordement des connexions par câbles et le déplacement spectral de l'oscillateur à masse unique de la modélisation. Le déplacement spectral est celui qui peut être lu directement du spectre de réponse de déplacement (cf. spectre de réponse).

Fréquence propre : Fréquence selon laquelle une structure oscille librement, p. ex. après avoir subi une poussée provoquant des oscillations. Les structures continues présentent théoriquement une quantité infinie de fréquences propres ; souvent on comprend implicitement sous le terme de "fréquence propre" la fréquence propre la plus basse – appelée plus précisément "fréquence propre fondamentale".

Fréquence propre fondamentale : Fréquence la plus basse selon laquelle une structure oscille librement, p. ex. après avoir subi une poussée (cf. "fréquence propre").

Haute tension : Sous "haute tension" on désigne tous les niveaux de tension égaux ou supérieurs à 1 kV.

Installations de la distribution d'énergie dans des armoires : Ces installations comprennent les installations à haute tension encoffrées dans des sortes d'armoires ainsi que les armoires de commande avec installations à basse tension (alimentation et besoins propres). Ce regroupement plutôt arbitraire du point de vue de la

technique d'énergie fait du sens dans le contexte de la sécurité sismique qui cherche en premier lieu à éviter le renversement de telles installations lors de tremblements de terre.

Justificatif : Sous "justificatif" on comprend aussi bien les contrôles de types que les justificatifs individuels ; ceux-ci peuvent se baser aussi bien sur des calculs que sur des essais. Si le justificatif se rapporte à un contrôle de types, il faut expliquer que le cas isolé concret correspond réellement aux conditions-cadres du contrôle de types.

Mou : Pour les connexions par câble on utilise le terme de "mou", emprunté au langage des marins, correspondant au mot anglais "slack". Un câble qui a du mou peut être tendu sans résistance notable avant que des forces plus importantes soient induites dans le câble. C'est exactement cela qui est important dans les connexions par câbles entre les différents appareils à haute tension. Les termes plus usuels de "jeu" ou "flexibilité", même s'ils désignent quelque chose de similaire, ne sont pas tout à fait exacts.

Niveaux de qualification "AF2", "AF3" et "AF5" : Diverses publications CEI [5], [6], [7] définissent une qualification sismique des appareils à haute tension. Cette qualification est classée en trois niveaux : bas ("low"), moyen ("moderate") et haut ("high"), appelés "AF2", "AF3" resp. "AF5". Ces niveaux correspondent à des accélérations du sol maximales (appelées "Zero Period Acceleration ZPA" dans les publications CEI) de 2, 3 resp. 5 m/s². Le contenu fréquentiel correspondant de l'action sismique à prendre en considération est défini comme il se doit à l'aide des spectres de réponse (appelés "Required Response Spektrum RRS" dans les publications CEI). Un appareil est qualifié de sismique s'il supporte le RRS correspondant des niveaux de qualification respectifs, soit mathématiquement, soit expérimentalement, sans que cela nuise fondamentalement à sa fonction.

Réseau de très haute tension resp. niveau de réseau 1 : réseau de transport suisse dans le domaine 50 Hz avec une tension de 380 kV ou 220 kV

Oscillation propre : Oscillation que fait librement une structure avec une fréquence propre ou une période propre provoquée, p. ex par une poussée.

Période propre : Période selon laquelle une structure oscille librement, p. ex. après avoir subi une poussée provoquant des oscillations. C'est l'inverse de la fréquence propre.

Spectre de réponse : Réponse (p. ex. réponse de l'accélération, appelée aussi "accélération spectrale", ou bien réponse du déplacement, appelée aussi "déplacement spectral") d'un oscillateur à masse unique à une excitation dynamique, en fonction de sa période propre et de son amortissement. L'effet sismique est généralement défini dans les normes de construction modernes sous forme de spectres de réponse lissés. Ceux-ci présentent ce que l'on appelle un plateau dans lequel l'accélération spectrale est indépendante de la période propre, typiquement quelque part entre 0,1 s et 1 s (quelque peu différent selon la classe de sol de fondation).

Tension haute : Pour un transformateur, la tension du niveau de réseau le plus élevé dont la tension est transformée au niveau de réseau le plus bas (tension basse).

Tension basse : voir tension haute.

Transformateurs : Sous le terme "transformateurs" on désigne ici uniquement des transformateurs de puissance, pôle régulateur inclus, mais pas les appareils de mesure comme les transformateurs d'intensité de courant ou de tension (appelés aussi "transformateurs" en français).

Transformateurs de machine : Transformateurs qui, en tant qu'élément d'une centrale, servent uniquement à la transformation de la tension du générateur à celle du réseau, sont désignés sous le terme de transformateurs de machine – ou aussi les transformateurs principaux lors d'un raccordement immédiat au générateur.

Transformateurs de puissance : Voir "Transformateurs".

3. Action sismique

3.1 Zones sismiques

L'aléa sismique déterminant pour un site donné doit être cherché dans la norme sur les structures porteuses en vigueur SIA 261 [3], chapitre 16.

La norme SIA 261 (2014), chapitre 16, définit pour la Suisse quatre zones sismiques : Z1, Z2, Z3a et Z3b (annexe A). La zone sismique Z1 correspond l'aléa le plus faible, la zone sismique Z3b à l'aléa le plus grand. Pour chaque zone sismique une valeur de référence pour l'accélération du sol maximale, dénommée valeur de calcul de l'accélération horizontale du sol a_{gd} , est définie (cf. le tableau 2). Ces valeurs de référence correspondent à une période de retour nominale de 475 ans, respectivement une probabilité de dépassement de a_{gd} de 10 % en 50 ans.

Tableau 2 : Valeurs de dimensionnement de l'accélération horizontale du sol selon la norme SIA 261 (2014) ; celles-ci doivent être multipliées par le facteur de sol de fondation S et le facteur d'importance γ .

| Zone sismique | Z1 | Z2 | Z3a | Z3b |
|---------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Valeur de référence SIA 261: a_{gd} | 0,6 m/s ² | 1,0 m/s ² | 1,3 m/s ² | 1,6 m/s ² |

En règle générale, la composante verticale de l'action sismique peut être négligée dans les calculs, car elle est d'importance moindre pour les installations de distribution d'énergie électrique.

3.2 Classes de sol de fondation

Les mouvements du sol lors d'un tremblement de terre dépendent fortement de la géologie du sol local. La norme SIA 261 en tient compte dans la mesure où la valeur de référence a_{gd} est multipliée par le facteur de sol de fondation S en fonction de la classe de sol de fondation. Ce facteur peut admettre des valeurs de 1 à 1,4 pour les classes de sol de fondation A à E, valeurs que l'on peut trouver dans le ta-

bleau 3. Pour la classe de sol de fondation F (rare), la valeur de S doit être déterminée à l'aide d'une étude de site. Pour la classe de sol de fondation C de loin la plus répandue dans le Plateau, le facteur de sol de fondation est $S = 1,15$.

Tableau 3 : Facteur de sol de fondation S en fonction de la classe de sol de fondation selon la norme SIA 261, tableau 24.

| | | | | | | |
|-------------------------------|-----|-----|------|------|-----|---|
| Classe de sol de fondation | A | B | C | D | E | F |
| Facteur de sol de fondation S | 1,0 | 1,2 | 1,15 | 1,35 | 1,4 | ? |

Sur un site internet de l'OFEV (<http://map.bafu.admin.ch>) il est possible de trouver pour de nombreuses régions de Suisse les cartes de classes de sol de fondation sur lesquelles il est facile de lire la classe de sol de fondation d'un emplacement donné.

En plus de l'accélération du sol maximale, la norme SIA 261 définit aussi le contenu fréquentiel des mouvements du sol, fortement influencé également par la géologie locale, à l'aide des spectres de réponse. Ceux-ci montrent que les accélérations sismiques des ouvrages et installations peuvent être nettement accentuées selon leur caractéristique dynamique, particulièrement leur fréquence propre fondamentale. Le lecteur trouvera la définition exacte des spectres de réponse dans la norme SIA 261 [3], chapitre 16.2.

Les spectres de réponse mentionnés peuvent être mieux définis pour les réalités géologiques spécifiques à un site grâce à une étude sismologique, appelée microzonage spectral. Là où il existe un microzonage, il est recommandé d'en tenir compte. Lorsque le microzonage donne un spectre de réponse plus défavorable, donc avec des accélérations spectrales plus élevées que le spectre de réponse de la norme SIA 261, le jugement d'un spécialiste en génie parasismique est nécessaire pour définir si les dispositions de la directive pour une zone sismique plus élevée doivent être respectées.

3.3 Classes d'ouvrages

La norme SIA 261 répartit les ouvrages en fonction de leur importance en trois classes d'ouvrages différentes : CO I, CO II et CO III. Les valeurs de référence du tableau 2 valent pour la CO I. Pour la CO II, respectivement III, ces valeurs doivent être multipliées par ce qu'on appelle le facteur d'importance γ_f de 1,2 respectivement 1,4 (tableau 4). Le facteur 1,4 représente les accélérations du sol maximales qui correspondent à une période de retour d'environ 1000 ans.

Tableau 4 : Facteur d'importance γ_f en fonction de la classe d'ouvrage.

| | | | |
|---------------------------------|-----|-----|-----|
| Classe d'ouvrage | I | II | III |
| Facteur d'importance γ_f | 1,0 | 1,2 | 1,4 |

Les objets comportant une "infrastructure ayant une fonction vitale" appartiennent à la CO III. Comme une panne de courant à grande échelle entrave singulièrement les actions de sauvetage, les sous-stations dont la tension la plus élevée est égale ou supérieure à 220 kV doivent être classées en CO III ; et donc, les valeurs de référence du tableau 2 doivent être multipliées par le facteur d'importance de $\gamma_f = 1,4$.

Les sous-stations dont la tension la plus élevée est < 220 kV ainsi que les stations transformatrices importantes doivent être classées au moins en CO II. Cependant, pour les sous-stations particulièrement importantes en ce qui concerne la sécurité d'alimentation, un classement supérieur en CO III est judicieux ; le surclassement relève de la responsabilité propre de l'exploitant de réseau.

Pour une multiplication de la valeur de dimensionnement de l'accélération horizontale du sol (tableau 2) avec le facteur de sol de fondation maximal 1,4 (tableau 3) et le facteur d'importance maximal 1,4 (tableau 4), une accélération du sol maximale de $3,1 \text{ m/s}^2$ en résulte dans la zone Z3b avec le plus grand aléa sismique.

3.4 Coefficient de comportement q

Il est largement répandu dans le génie parasismique de calculer de façon purement élastique et de tenir compte globalement aussi bien de la surrésistance du matériau par rapport aux valeurs de résistance théoriquement nécessaires que du comportement plastique du système à l'aide de ce que l'on appelle un coefficient de comportement q ; pour cela, les sollicitations calculées de façon élastique sont divisées par q.

Dans le cadre de la présente directive, pour le contrôle au basculement de transformateurs, d'appareils à très haute tension, d'armoires de commande, etc., il faut calculer avec $q = 1,0$. Pour le contrôle de résistance, p. ex. de boulons d'ancrage, les résistances théoriquement nécessaires du matériel doivent être augmentées du coefficient de comportement $q = 1,5$ pour tenir compte de la surrésistance (cf. l'exemple de calcul dans l'annexe D).

Pour les bâtiments, les coefficients de comportement indiqués dans les normes sur les structures porteuses de la SIA peuvent être utilisés.

4. Dispositions pour la sécurité sismique de la technique des installations

Les dispositions présentées ci-après, établies en fonction des zones sismiques, concernent, exception faite du paragraphe suivant et des chapitres 4.3 et 4.5, les sous-stations isolées à l'air et les stations transformatrices. Les valeurs de l'accélération spectrale et du mou nécessaire indiquées dans les chapitres 4.1, 4.2 et 4.4 ne sont valables que pour les transformateurs et appareils installés, soit de plain-pied, soit dans un bâtiment à une hauteur ne dépassant pas un rez-de-chaussée surélevé. Lors d'une installation dans les étages supérieurs d'un bâtiment, il faut prendre en compte que les mouvements provoqués par un séisme peuvent

être amplifiés par le bâtiment. Pour cela, il est possible de se reporter à la norme SIA 261, particulièrement au chapitre 16.7.

Les expériences à l'étranger montrent que, pour les séismes auxquels il faut s'attendre en Suisse, les installations SF₆ sont pour la plupart peu critiques à condition qu'elles soient suffisamment ancrées. Lors de la construction de nouvelles installations et du remplacement d'installations existantes SF₆ de 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) et plus, il est recommandé de demander au fabricant les certificats sismiques correspondants et, pour tous les niveaux de tension, de veiller à ancrer suffisamment tous les éléments de l'installation. En outre, il faut veiller particulièrement dans les zones sismiques Z3a et Z3b à ce que les entrées de tuyaux ou de câbles dans le bâtiment aient assez de jeu pour que des tassements différentiels possibles de quelques centimètres ne puissent pas provoquer le cisaillement des tuyaux ou des câbles.

Les indications relatives à la répartition en classes d'ouvrages des sous-stations se trouvent au chapitre 3.3.

Les éléments potentiellement les plus vulnérables sont les transformateurs ainsi que, pour le réseau de très haute tension (niveau de réseau 1) resp. pour la tension 132 kV (16,7 Hz), les modèles anciens de disjoncteurs de puissance et les transformateurs de courant à tête car ils présentent des masses relativement grandes en hauteur, ce qui est défavorable en cas de séisme.

En principe, trois causes différentes sont constatées pour les dommages aux transformateurs et appareils à haute tension. Ce sont en ordre décroissant :

1. les forces d'interaction dues aux déplacements relatifs entre les appareils connectés par des conducteurs avec un mou insuffisant pour pouvoir compenser ces déplacements relatifs sans être tendus; en cas de fort séisme en Suisse aujourd'hui, de telles interactions seraient très vraisemblablement le responsable le plus important des dommages causés aux appareils à haute tension.
2. les forces d'inertie dues aux chocs : ceux-ci résultent d'ancrages flexibles ou ayant du jeu ; l'appareil est accéléré et heurte violemment une butée. Ceci peut provoquer des pointes d'accélération qui sont nettement plus élevées que les accélérations sismiques du sol. Lors d'un soulèvement temporaire de transformateurs, des chocs violents peuvent aussi en résulter lorsqu'ils retombent.
3. les forces d'inertie dues aux accélérations sismiques du sol.

Toutes ces causes mènent typiquement à des ruptures dans les éléments cassants, p. ex. en porcelaine ou en fonte d'aluminium, tandis que les isolateurs en matière synthétique se comportent généralement mieux.

Les dispositions des chapitres 4.1 et 4.2 doivent prévenir les dommages dus aux causes n° 2 et 3 sur les transformateurs et appareils à haute tension. Le chapitre 4.3 est consacré aux installations de la distribution d'énergie en armoires. La problématique importante d'un mou suffisant est réglée dans le chapitre 4.4. L'annexe D contient une feuille au calcul qui permet de déterminer les forces d'ancrages pour les transformateurs et appareils à haute tension ainsi que le besoin de mou dans les câbles conducteurs selon le tableau 8. Le chapitre 4.5 est consacré aux systèmes secondaires.

Remarque: Les types spéciaux de sous-stations (comme par ex. les sous-stations mobiles) sont à contrôler de cas en cas en raison de leurs propriétés dynamiques spécifiques.

4.1 Sécurité sismique des transformateurs

Les dispositions relatives à la sécurisation des transformateurs sont détaillées dans le tableau 5. Elles sont valables pour tous les transformateurs

- dont la tension haute est égal ou supérieur à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz),
- dont la tension haute est inférieur à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz), mais dont le degré d'élanement dépasse une valeur qui dépend de la zone sismique.

Tableau 5 : Dispositions parasismiques pour les nouveaux transformateurs. Les valeurs de l'accélération spectrale¹⁾ indiquées sont valables pour la classe d'ouvrage III ($\gamma = 1,4$) et pour la classe de sol de fondation E la plus défavorable ; pour les autres classes de sol de fondation, les valeurs peuvent être calculées directement à partir du tableau 6a resp. reprises du tableau 6b.

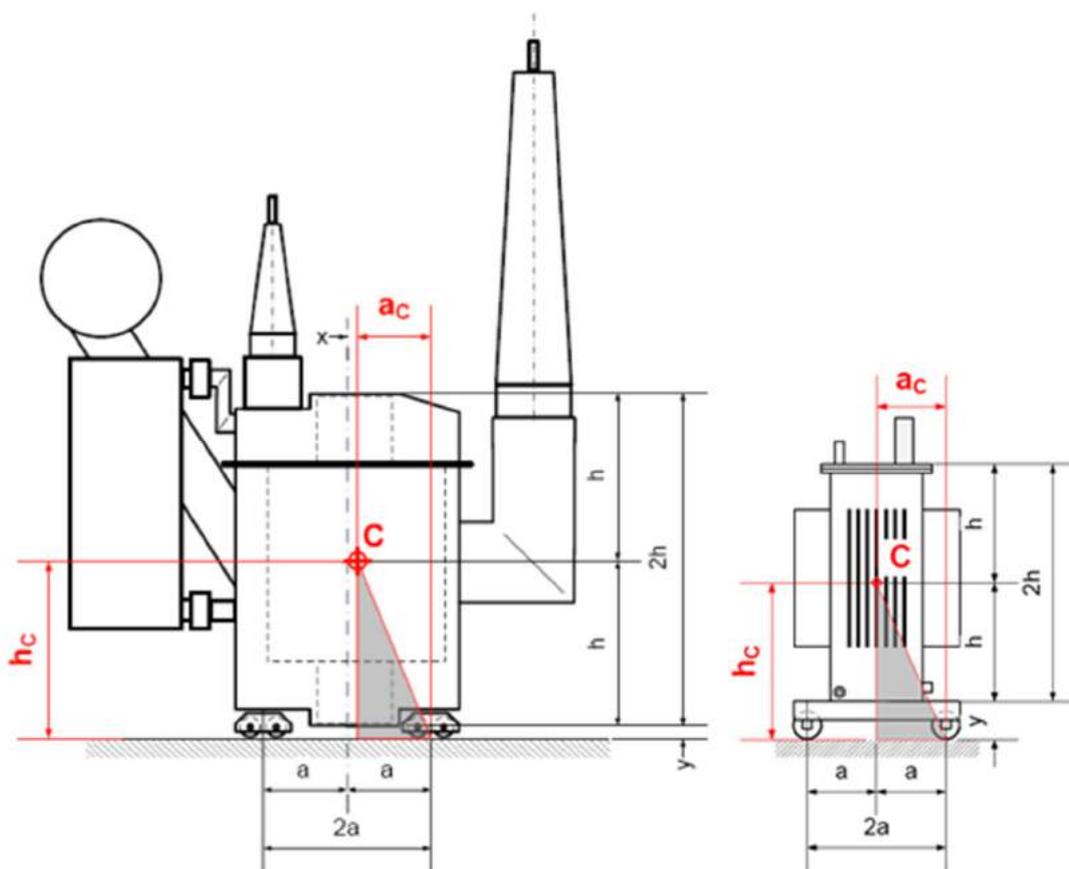
| | Transformateurs concernés par les dispositions | Certificat sismique à demander au fabricant si la puissance est > 2,5 MVA | Ancrage concernant le soulèvement et le cisaillement |
|--------------|--|--|---|
| Zone Z3a/Z3b | toutes les tensions | pour une accélération spectrale ²⁾ de 9,4 m/s ² (Z3b) resp. 7,6 m/s ² (Z3a) | justificatif des calculs exigé |
| Zone Z2 | tous ceux avec tensions \geq 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) OU tous ceux avec degré d'élanement > 2 | pour une accélération spectrale ²⁾ de 5,9 m/s ² | justificatif des calculs exigé |
| Zone Z1 | tous ceux avec tensions \geq 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) OU tous ceux avec degré d'élanement > 3 | – | justificatif des calculs exigé concernant le cisaillement resp. le roulement ; en plus, sécurisation de la construction contre le soulèvement recommandée |

¹⁾ Les accélérations du sol maximales correspondantes sont d'un facteur 3 plus faibles.

²⁾ Si des transformateurs sont classés en classe d'ouvrage II (cas normal pour le domaine des chemins de fer), alors le certificat sismique doit être demandé pour une accélération spectrale réduite du facteur 1,17 (1,4/1,2).

Le degré d'élanement s représente le rapport de la hauteur du centre de gravité h_c à la distance minimale horizontale a_c entre le centre de gravité et "l'arête" la plus proche sur laquelle un renversement pourrait se produire (cf. illustration 1). Pour information : pour les transformateurs du réseau de très haute tension (niveau de réseau 1), les degrés d'élanement typiques se situent entre 3,3 à 3,6 ; pour les transformateurs de distribution d'une puissance < 2,5 MVA, par contre, plutôt entre 2,0 et 2,5.

Les justificatifs nécessaires pour les certificats sismiques peuvent être faits à partir de calculs ou d'essais. Les renvois à des justificatifs explicites pour les transformateurs d'un type similaire sont autorisés s'il peut être prouvé de façon compréhensible que le transformateur à certifier pourrait se comporter au moins aussi bien que ceux pour lesquels le justificatif explicite a été réalisé.



- ill. 1: Degré d'élanement s d'un transformateur: $s = h_c/a_c$
 h_c est la hauteur du centre de gravité et a_c la distance minimale horizontale entre le centre de gravité C et une "arête" sur laquelle un renversement pourrait se produire.

Les transformateurs ont généralement des fréquences propres situées dans le plateau du spectre de réponse [2]. C'est pourquoi pour le dimensionnement de l'ancrage – si aucun examen plus détaillé n'est fait – il faut partir d'une accélération spectrale effective (tableaux 6a et 6b) qui est trois fois plus élevée que l'accélération du sol maximale. Cela tient compte de l'amplification de l'accélération sur le plateau (facteur 2,5) ainsi que d'un amortissement de 2 %

(facteur 1,2) de l'amortissement critique. Pour le calcul des forces d'ancrage il faut placer la force résultant de l'action sismique – accélération spectrale effective multipliée par la masse du transformateur – un peu au-dessus de la hauteur du centre de gravité, car le transformateur a un mouvement de basculement lors d'un séisme. Cela signifie que les forces d'inertie – pour une répartition équilibrée de la masse – augmentent avec la hauteur. Il est recommandé de placer la force d'inertie résultant de l'action sismique approximativement à une hauteur de 1,2 h_c.

Les transformateurs qui nécessitent une sécurisation contre le soulèvement, mais qui doivent être isolés à cause de problèmes de son solidien, doivent être ancrés de façon que les forces d'inertie puissent être transmises au support sans pont de son solidien. Des exemples d'ancrages pour transformateurs sont présentés dans l'annexe B.

Tableau 6a : Valeurs de référence des accélérations spectrales ($3 a_{gd}$) à appliquer pour les transformateurs et appareils à haute tension pour le calcul des forces d'ancrage quand des calculs plus précis font défaut. Les valeurs indiquées doivent encore être multipliées par le facteur de sol de fondation S et le facteur d'importance γ .

| Zone sismique | Z1 | Z2 | Z3a | Z3b |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Valeur de réf. de l'accélération spectrale | 1,8 m/s ² | 3,0 m/s ² | 3,9 m/s ² | 4,8 m/s ² |

Tableau 6b : Accélérations spectrales effectives pour les classes de sol de fondations les plus courantes qui doivent être appliquées pour les transformateurs et appareils à haute tension pour CO III ($\gamma = 1,4$) pour le calcul des forces d'ancrage quand des calculs plus précis font défaut.

| Zone sismique | Z1 | Z2 | Z3a | Z3b |
|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Classe de sol de fondation C | 2,9 m/s ² | 4,8 m/s ² | 6,3 m/s ² | 7,7 m/s ² |
| Classe de sol de fondation D | 3,4 m/s ² | 5,7 m/s ² | 7,4 m/s ² | 9,1 m/s ² |
| Classe de sol de fondation E | 3,5 m/s ² | 5,9 m/s ² | 7,6 m/s ² | 9,4 m/s ² |

Pour les raccordements directs – sans mou – à des transformateurs à partir d'installations à isolation gazeuse, il faut procéder à des investigations particulières dans les zones sismiques Z2, Z3a et Z3b.

4.2 Sécurité sismique des appareils à haute tension

Les dispositions relatives à la sécurisation parasismique des appareils à haute tension sont présentées dans le tableau 7. Elles sont valables pour tous les appareils à haute tension d'un niveau de tension égal ou supérieur à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz); pour les appareils entre 110 kV (50 Hz) et 220 kV (50 Hz), elles ont valeur de recommandations.

Si les appareils à haute tension sont montés sur des châssis de support flexibles, ce qui est le cas la plupart du temps, il faut clarifier leur influence en concertation avec le fournisseur. Dans ces cas-là, une certification sismique des appareils à un échelon supérieur est éventuellement nécessaire (p. ex. "AF5" au lieu de "AF3"). Lors du renouvellement d'un appareil, les fondations existantes maintenues doivent, si nécessaires, être adaptées constructivement.

Tableau 7 : Dispositions parasismiques pour nouveaux appareils à haute tension.

| | Appareils à haute tension concernés par les dispositions | Certificat sismique à demander au fabricant selon CEI [5, 6, 7] | Ancrage concernant le basculement et le cisaillement |
|------------|---|---|--|
| Zone 3a/3b | tous ceux avec tensions ≥ 220 kV (50 Hz) resp. ≥ 132 kV (16,7 Hz); recommandations pour tensions > 110 kV (50 Hz) | Compatible "AF3" y.c. châssis de support | justificatif des calculs exigé |
| Zone 2 | tous ceux avec tensions ≥ 220 kV (50 Hz) resp. ≥ 132 kV (16,7 Hz); recommandations pour tensions > 110 kV (50 Hz) | Compatible "AF2" y.c. châssis de support | justificatif des calculs exigé |
| Zone 1 | tous ceux avec tensions ≥ 220 kV (50 Hz) resp. ≥ 132 kV (16,7 Hz) | – | constructif |

Les appareils à haute tension d'un niveau de tension égal ou supérieur à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) ont – châssis de support inclus – majoritairement des fréquences propres situées sur le plateau de la sollicitation sismique. C'est pourquoi, pour le dimensionnement de l'ancrage il faut partir – si aucun examen plus détaillé n'est fait – d'une accélération spectrale effective (tableaux 6a et 6b) qui est trois fois plus élevée que l'accélération maximale du sol. Ceci tient compte de l'amplification de l'accélération sur le plateau (facteur 2,5) ainsi que d'un amortissement de 2 % (facteur 1,2) de l'amortissement critique. Pour le calcul des forces d'ancrage, il faut appliquer la force horizontale résultante – accélération spectrale effective multipliée par la masse de l'appareil – approximativement à 1,2 fois la hauteur du centre de gravité, dans la mesure où aucune recherche plus précise n'est faite.

Pour les appareils à haute tension de réserve, par exemple dans les centres d'entretien, il faut faire attention qu'ils ne soient pas endommagés en cas de séisme, soit par renversement, soit par des objets tombant des étagères.

4.3 Installations de la distribution d'énergie dans des armoires

Pour les installations à haute tension et pour les installations de la distribution d'énergie avec des tensions ≤ 1000 V montés dans des armoires, les dispositions du chapitre 4.5 de cette directive sont applicables en substance, dans le but de pré-

venir le renversement des armoires causé par un séisme. Dans le domaine des chemins de fer, il faut éviter les migrations de potentiels lors des mesures de sécurisation mécaniques.

La subordination des installations de ce type à cette directive est due aux expériences qui ont prouvé l'importance capitale de la distribution d'énergie électrique pour les travaux de sauvetage suite à un séisme. Lors d'un séisme les installations de distribution de moyenne à basse tension (niveau de tension 3 à 5 (50 Hz) resp. inférieur à 132 kV (16,7 Hz)) se situent toujours dans la zone sinistrée en raison de leur nombre et de leur concentration géographique. Mais la distribution d'énergie après une catastrophe sismique dépend de manière décisive du maintien du fonctionnement de telles installations dans les régions touchées.

4.4 Connexions parasismiques

Les dispositions relatives aux connexions parasismiques sont valables pour tous les appareils à haute tension d'un niveau de tension égal ou supérieur à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz); pour les appareils entre 110 kV (50 Hz) et 220 kV (50 Hz), elles ont valeur de recommandations.

Les connexions entre deux appareils à haute tension doivent avoir suffisamment de mou pour que les appareils puissent osciller indépendamment les uns des autres en cas de séisme sans que la connexion se tende. Sinon, de grandes forces d'interaction peuvent se produire qui mènent typiquement à des ruptures des isolateurs en porcelaine. En même temps, il faut faire attention à ce que les distances minimales électriques nécessaires entre chaque phase ou par rapport à la terre soient respectées et que, en cas de court-circuit, les forces produites ne puissent pas endommager les appareils.

Des câbles conducteurs verticaux reliant l'appareil à des conducteurs horizontaux situés au-dessus représentent la façon la plus appropriée de permettre de très grands déplacements relatifs sans descendre au-dessous des distances minimales électriques. Un exemple de ce type, en Suisse, est présenté dans l'illustration 2.



ill. 2 : Disjoncteurs de puissance de 380 kV reliés essentiellement par des câbles verticaux aux appareils voisins : cette configuration permet de grands déplacements sismiques sans provoquer la tension des câbles.

D'autres configurations appropriées, comme le recommande la norme US IEEE Std 1527-2006 [8], sont présentées dans l'illustration 3. Un net déport vertical entre les points de connexion à relier est en général favorable pour respecter les exigences, a priori contradictoires, du besoin en déplacement relatif d'un côté et du maintien des distances minimales électriques d'autre part.

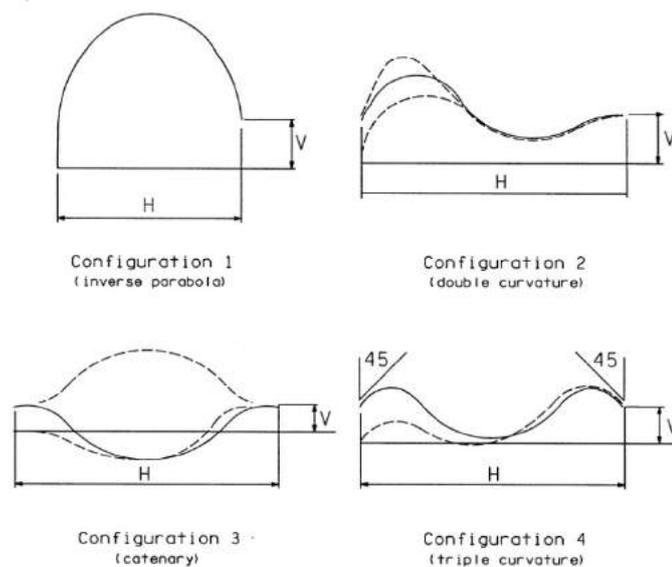
La longueur de conducteur minimale nécessaire, L_0 , entre deux appareils reliés entre eux est, selon la US IEEE Std 693-2005 [9], chapitre 5.9:

$$L_0 = L_1 + 1,5 \Delta + L_2. \quad (1)$$

avec

- L_0 longueur de conducteur minimale nécessaire,
- L_1 distance la plus courte entre les points de connexions,
- Δ déplacement relatif maximal des points de connexion auquel il faut s'attendre pendant le séisme de dimensionnement,
- L_2 longueur supplémentaire dépendant de la configuration des conducteurs (voir ci-dessous).

La longueur supplémentaire L_2 dépend de la configuration des conducteurs et de la rigidité à la flexion du conducteur – en général non négligeable ; elle doit garantir que les points de connexion n'aient pas à absorber des moments de flexion inutiles. La longueur L_2 peut être déterminée à partir d'essais ou de calculs. La détermination théorique de L_2 peut être contournée en veillant directement au montage d'un câble conducteur à ce que la distance entre deux points de connexion à relier puisse être augmentée de $1,5 \Delta$ avant que le câble conducteur se tende et sans que se produisent de grands moments de flexions (moments secondaires) dans les points de connexions des conducteurs.



ill. 3 : Configurations de conducteurs recommandées par la norme américaine IEEE Std 1527-2006 [8].

Appareils 50 Hz

Si aucun calcul sismique n'est fait, il est possible de reprendre approximativement pour "1.5 Δ " les valeurs du tableau 8, qui sont du côté sécuritaire dans la plupart des cas et valables pour la classe d'ouvrages III.

Si les valeurs du tableau 8 sont utilisées également, au sens de recommandation, pour des sous-stations dont la plus haute tension est supérieure à 110 kV mais inférieure à 220 kV, elles peuvent être multipliées par le facteur 0,75. Ceci vaut pour les sous-stations classées en CO II ; lorsqu'elles sont classées en CO III, un facteur 0,9 est préconisé. Mais le mou entre deux appareils voisins ne devrait en aucun cas être inférieur à la valeur minimale de 30 mm. Pour les niveaux de tension plus bas, le tableau est sans objet ; dans ces cas-là, le maintien d'un mou minimal n'est pas nécessaire.

Tableau 8 : Mou nécessaire "1.5 Δ " en [mm] qui doit exister dans le conducteur entre deux appareils à haute tension (sans transformateurs), en relation avec les fréquences propres fondamentales f_{01} et f_{02} des appareils reliés, la zone sismique et la classe de sol de fondation, valable pour la classe d'ouvrage III. Si le tableau est également utilisé pour des transformateurs, il faut compter avec une fréquence propre de 2 Hz du côté des transformateurs.

| Fréquences propres fondamentales f_{01} et f_{02} | Classe de sol de fondation | Zone Z1 1,5 Δ [mm] | Zone Z2 1,5 Δ [mm] | Zone Z3a 1,5 Δ [mm] | Zone Z3b 1,5 Δ [mm] |
|---|----------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 2 Hz – 2 Hz | A | 45 | 75 | 95 | 115 |
| | B, C | 65 | 110 | 140 | 170 |
| | D, E | 75 | 125 | 165 | 200 |
| 2 Hz – 3 Hz | A | 35 | 60 | 80 | 95 |
| | B, C | 50 | 85 | 110 | 135 |
| | D, E | 60 | 100 | 130 | 160 |
| 2 Hz – 4 Hz | A | 35 | 55 | 70 | 85 |
| | B, C | 50 | 80 | 105 | 125 |
| | D, E | 55 | 95 | 120 | 145 |
| 3 Hz – 3 Hz | A | 30 | 45 | 60 | 75 |
| | B, C | 35 | 55 | 70 | 90 |
| | D, E | 40 | 65 | 85 | 100 |
| 3 Hz – 4 Hz | A | 30 | 35 | 45 | 60 |
| | B, C | 30 | 45 | 55 | 70 |
| | D, E | 30 | 50 | 65 | 80 |

Si les fréquences fondamentales propres, châssis de support *inclus*, ne sont pas connues, on peut se baser approximativement, avec le tableau 8, sur les hypothèses suivantes :

- disjoncteurs de puissance, transformateurs de courant et de tension ainsi que groupes de mesure combinés : 2 Hz,

- isolateurs de support et sectionneur de pantographes : 3 Hz,
- parafoudres et sectionneurs rotatifs : 4 Hz.

Pour les appareils avec châssis de support particulièrement hauts (comme par exemple, à cause d'un risque d'inondation, à Benken ou à Chamoson), il faut augmenter les valeurs du tableau 8 de 20 %. On peut renoncer à cette augmentation si on peut prouver par des mesures de fréquence propre que les fréquences fondamentales propres ne se situent pas plus bas que celles indiquées ci-dessus.

Le tableau 8 peut également être utilisé pour déterminer le mou nécessaire dans les connexions de câbles avec traversées de transformateurs. Mais dans ce cas, il faut utiliser une fréquence de 2 Hz du côté des traversées bien que la véritable fréquence propre fondamentale puisse être de 3 Hz ou plus élevée. Cette base de 2 Hz au lieu de 3 Hz ou plus couvre le facteur de participation nettement plus haut valable pour les traversées de transformateurs.

Le tableau 8 est conçu de façon qu'il puisse être utilisé pour tous les cas usuels dans la branche et que les valeurs soient presque toujours du côté sécuritaire. Si la détermination du mou nécessaire pose des problèmes, il vaut la peine de procéder à des mesures de la fréquence propre et d'évaluer plus précisément le facteur de participation pour permettre de mieux déterminer le besoin de mou. Cette procédure affinée peut s'avérer judicieuse particulièrement pour les zones sismiques Z3a et Z3b.

Appareils 16,7 Hz

Si aucun calcul sismique n'est fait, il est possible de reprendre approximativement pour "1.5 Δ " les valeurs du tableau 9, qui sont du côté sécuritaire dans la plupart des cas et valables pour la classe d'ouvrages II. Le tableau 9 est valable pour le niveau de tension 132 kV. Pour les niveaux de tension plus bas, le tableau est sans objet ; dans ces cas-là, le maintien d'un mou minimal n'est pas nécessaire.

Si les fréquences fondamentales propres, châssis de support *inclus*, ne sont pas connues, on peut se baser approximativement, avec le tableau 9, sur les hypothèses suivantes :

- disjoncteurs de puissance, transformateurs de courant et de tension ainsi que groupes de mesure combinés : 2,5 Hz,
- isolateurs de support et sectionneur de pantographes : 3 Hz,
- parafoudres et sectionneurs rotatifs : 4 Hz.

Pour les appareils avec châssis de support particulièrement hauts (comme par exemple, à cause d'un risque d'inondation, à Benken ou à Chamoson), il faut augmenter les valeurs du tableau 9 de 20 %. On peut renoncer à cette augmentation si on peut prouver par des mesures de fréquence propre que les fréquences fondamentales propres ne se situent pas plus bas que celles indiquées ci-dessus.

Le tableau 8 peut également être utilisé pour déterminer le mou nécessaire dans les connexions de câbles avec traversées de transformateurs. Mais dans ce cas, il faut utiliser une fréquence de 2,5 Hz du côté des traversées bien que la véritable fréquence propre fondamentale puisse être de 3 Hz à 4 Hz ou plus. Cette base de 2,5 Hz au lieu de 3 Hz ou plus couvre le facteur de participation nettement plus haut valable pour les traversées de transformateurs.

Tableau 9 : Mou nécessaire " 1.5Δ " en [mm] qui doit exister dans le conducteur entre deux appareils à haute tension (sans transformateurs), en relation avec les fréquences propres fondamentales f_{01} et f_{02} des appareils reliés, la zone sismique et la classe de sol de fondation, valable pour la classe d'ouvrage II. Si le tableau est également utilisé pour des transformateurs, il faut compter avec une fréquence propre de 2,5 Hz du côté des transformateurs.

| Fréquences propres fondamentales f_{01} et f_{02} | Classe de sol de fondation | Zone Z1 1,5 Δ [mm] | Zone Z2 1,5 Δ [mm] | Zone Z3a 1,5 Δ [mm] | Zone Z3b 1,5 Δ [mm] |
|---|----------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 2,5 Hz – 2,5 Hz | A | 30 | 50 | 65 | 80 |
| | B, C | 40 | 60 | 80 | 95 |
| | D, E | 45 | 70 | 90 | 110 |
| 2,5 Hz – 3 Hz | A | 30 | 45 | 55 | 70 |
| | B, C | 35 | 55 | 70 | 85 |
| | D, E | 40 | 60 | 80 | 95 |
| 2,5 Hz – 4 Hz | A | 30 | 40 | 50 | 60 |
| | B, C | 30 | 45 | 60 | 75 |
| | D, E | 35 | 55 | 70 | 85 |
| 3 Hz – 3 Hz | A | 30 | 35 | 45 | 55 |
| | B, C | 30 | 45 | 55 | 65 |
| | D, E | 30 | 50 | 65 | 80 |
| 3 Hz – 4 Hz | A | 30 | 30 | 40 | 45 |
| | B, C | 30 | 35 | 45 | 55 |
| | D, E | 30 | 40 | 55 | 65 |

Le tableau 9 est conçu de façon qu'il puisse être utilisé pour tous les cas usuels dans la branche et que les valeurs soient presque toujours du côté sécuritaire. Si la détermination du mou nécessaire pose des problèmes, il vaut la peine de procéder à des mesures de la fréquence propre et d'évaluer plus précisément le facteur de participation pour permettre de mieux déterminer le besoin de mou. Cette procédure affinée peut s'avérer judicieuse particulièrement pour les zones sismiques Z3a et Z3b.

4.5 Sécurité sismique des systèmes secondaires et autres équipements

Pour toutes les zones sismiques et tous les niveaux de tension, les systèmes secondaires, tels que armoires de commande, batteries de secours ou groupes électrogènes, etc., et les équipements, tels que faux-planchers, cloisons de séparation, etc., doivent être sécurisés contre les séismes ; il faut en particulier prouver leur stabilité statique. Les éléments de construction non-structuraux, les installations et les équipements pertinents ainsi que les mesures et les responsabilités doivent être définies spécifiquement pour chaque projet, par exemple dans le cadre de la convention d'utilisation (voir entre autres l'annexe F).

En fonction du concept de mise à terre, il peut s'avérer nécessaire dans le domaine des chemins de fer de mettre en œuvre des ancrages isolés (entre autres pour les supports et appareils).

Pour le dimensionnement ou le justificatif de tels éléments, il faut se baser sur la norme SIA 261 [3], chapitre 16.7. Souvent cependant de simples mesures constructives suffisent également. Des exemples de mesures sont présentés dans la publication de l'OFEV "Sécurité sismique d'éléments de construction non-structuraux et d'autres installations et équipements" [11].

Des exemples de sécurisation de systèmes secondaires (batteries de secours, armoires de commande) sont présentés dans l'annexe E.

5. Dispositions pour la sécurité sismique des bâtiments

Les nouveaux bâtiments, indépendamment des niveaux de tension, doivent être dimensionnés selon les normes SIA sur les structures porteuses en vigueur (SIA 260 à 267). Pour les nouveaux bâtiments, il faut établir une convention d'utilisation. En plus de la structure porteuse, les éléments de constructions non-structuraux, les installations et les équipements doivent être parasismique (cf. chapitre 4.5).

Lors de la rénovation d'une partie notable d'installations à haute tension dans un bâtiment existant présentant une sécurité sismique insuffisante, il faut procéder à un confortement parasismique du bâtiment, s'il est possible de le réaliser à des coûts proportionnels et que les conditions de propriété le permettent. Pour déterminer ce qui est considéré comme "proportionnel", il faut consulter la norme SIA 269/8 [10]. Toutefois il faut noter que dans ces cas la sécurité des personnes est moins à mettre en avant que la sécurité de l'approvisionnement. Il faut considérer une possible interruption d'approvisionnement non seulement par rapport à la perte de gain liée à l'énergie non livrée, mais surtout par rapport aux conséquences pour la société, notamment l'éventuelle complication des travaux de sauvetage dans un vaste périmètre.

6. Dispositions pour la sécurité sismique des lignes

6.1 Lignes aériennes

Les dispositions relatives à la sécurité sismique des lignes aériennes sont valables pour les tensions égales et supérieures à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz). Pour les lignes aériennes avec des tensions entre 110 kV (50 Hz) et 220 kV (50 Hz), elles ont valeur de recommandations.

Dans la plupart des cas, les lignes aériennes résistent sans dommages significatifs même aux très forts séismes. Mais des problèmes pouvant entraîner une panne totale de la ligne apparaissent si les fondations des mâts subissent des déplacements permanents importants. Ceux-ci peuvent se produire lors de glissements de terrain ou de liquéfaction du sol déclenchés par le séisme.

Lors de la construction de lignes aériennes du réseau de très haute tension (niveau de réseau 1) et en raison de sa faible redondance du réseau 132 kV (16,7 Hz), il faut juger au moins qualitativement si le déclenchement de glissements de terrain ou l'apparition de liquéfaction du sol à l'emplacement des mâts peuvent être exclus sans examen plus détaillé. En ce qui concerne les glissements de terrain, les cartes de dangers donnent une première indication dans la mesure où la région concernée est répertoriée. En cas de doute, il faut procéder à une analyse quantitative en se basant sur la norme SIA 267 [12].

6.2 Câbles d'alimentation

En règle générale, les câbles d'alimentation ne posent pas de problèmes.

Pour les aménagements d'entrées (entrée dans des ponts ou des bâtiments), il faut faire attention aux possibles déplacements différentiels pouvant atteindre quelques centimètres. Pour les traversées de terrains potentiellement glissants, la prudence s'impose ; dans la mesure du possible, ces terrains sont à traverser dans la ligne de plus grande pente.

Les câbles d'alimentation ne doivent pas passer sur des ponts présentant une sécurité sismique insuffisante.

7. Recommandations pour les sous-stations existantes "importantes"

Un confortement parasismique d'installations existantes est recommandé

- s'il est réalisable avec de faibles investissements (valable normalement pour la sécurisation des systèmes secondaires), dans toutes les zones sismiques ;
- s'il s'agit du point de vue de la sécurité d'alimentation régionale d'éléments d'installation "particulièrement importants" pour lesquels aucun renouvellement n'est prévu dans les 20 ou plus prochaines années ; cette recommandation se limite aux zones sismiques Z2, Z3a et Z3b.

Il relève de la responsabilité propre des exploitants d'identifier les éléments d'installation existants particulièrement importants et de vérifier si un confortement parasismique serait "proportionnel". Une possible interruption d'approvisionnement doit être considérée non seulement par rapport à la perte de gain de l'énergie non livrée, mais surtout par rapport aux conséquences pour la société, notamment la complication drastique des travaux de sauvetage dans un vaste périmètre.

Il est recommandé de déterminer pour les éléments d'installation existants particulièrement importants, avec une longue durée de vie restante, situés dans les zones sismiques Z2, Z3a et Z3b

- si les transformateurs peuvent être ancrés contre le soulèvement grâce à des investissements proportionnels,
- si les fondations et ancrages des appareils à haute tension de tension égale ou supérieure à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) sont suffisants et, dans le cas contraire, si un confortement à coûts proportionnels est possible,
- si le mou disponible dans les câbles conducteurs entre des appareils d'une tension égale ou supérieure à 220 kV (50 Hz) resp. 132 kV (16,7 Hz) suffit et, dans le

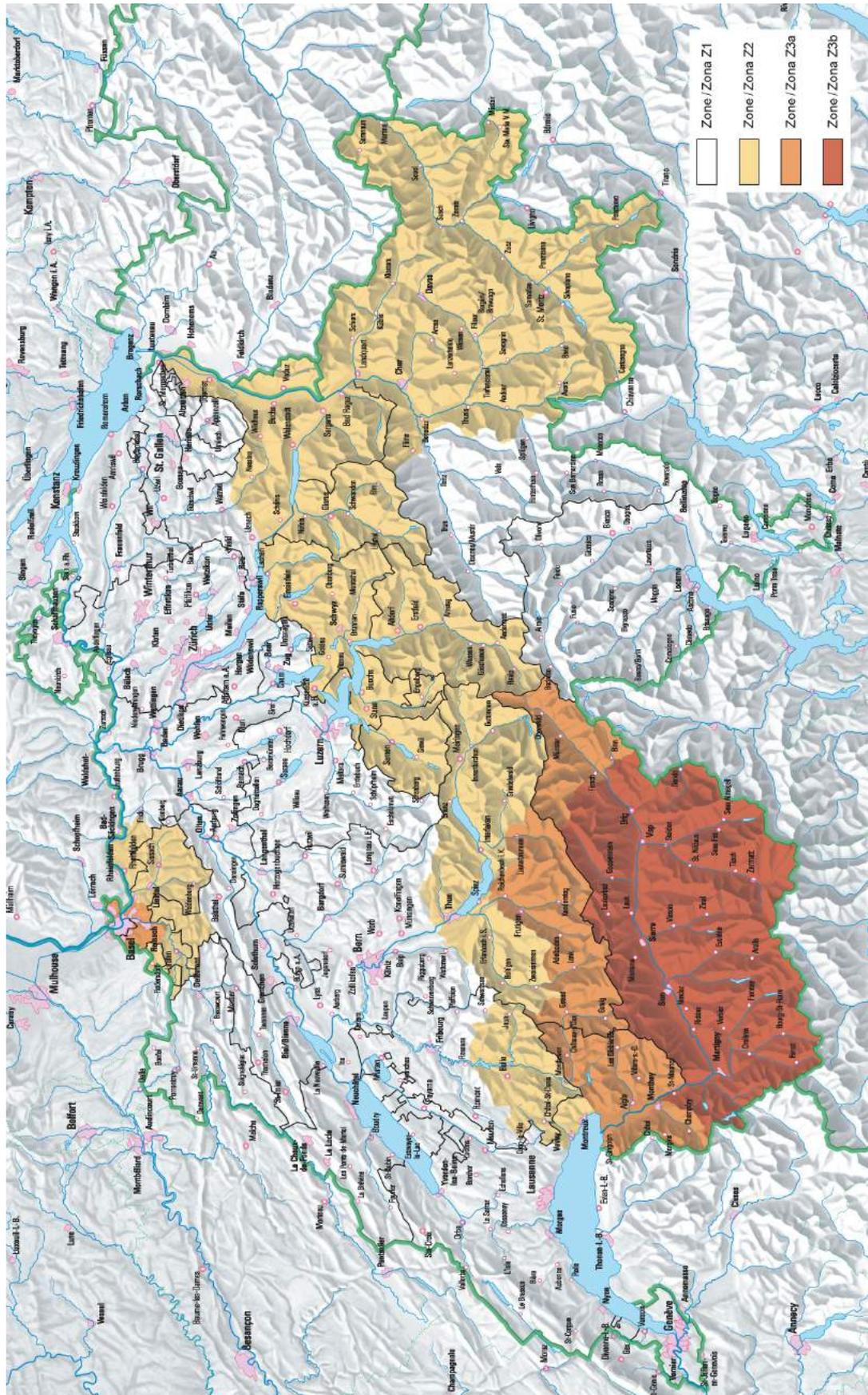
cas contraire, si un nouveau câblage sans changement de la configuration générale – et sans violation des dispositions relatives aux distances minimales – à coûts proportionnels est possible.

Si un confortement complet ou même partiel est estimé proportionnel, il est recommandé de le mettre en place.

8. Sources

- [1] Koller M.G. (2009), "Sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse", 1^{er} rapport intermédiaire, sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement, Résonance, Carouge.
- [2] Koller M.G. (2011), "Sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse", 2^{ème} rapport, sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement, Résonance, Résonance, Carouge.
- [3] SIA 261 (2014): Actions sur les structures porteuses, Norme Suisse SN 505 261, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich.
- [4] ASCE (1999): "Guide to Improved Earthquake Performance of Electric Power Systems", ASCE Manual and Reports on Engineering Practice n° 96, éd. Schiff, A. J., Reston, Virginia.
- [5] (SN) EN 62271-207:2007 [IEC 62271-207:2007]: Appareillage à haute tension -- Partie 207 : Qualification sismique pour ensembles d'appareillages à isolation gazeuse pour des niveaux de tension assignée supérieurs à 52 kV.
- [6] IEC TS 61463 (2000): Spécification technique, Traversées - Qualification sismique, CEI.
- [7] IEC TR 62271-300 (2006): Guide, Appareillage à haute tension - Partie 300 : Qualification sismique des disjoncteurs à courant alternatif, CEI.
- [8] IEEE Std 1527-2006 (2006): IEEE Recommended Practice for the Design of Flexible Buswork Located in Seismically Active Areas, IEEE Power Engineering Society, New York.
- [9] IEEE Std 693-2005 (2005): IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations, recognized as an American National Standard, IEEE Power Engineering Society, New York.
- [10] SIA 269/8 (2015): Maintenance des structures porteuses – Séismes, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich. Le cahier technique SIA 2018 (2004), Vérification de la sécurité sismique des bâtiments existants, reste valable jusqu'à l'entrée en vigueur de la norme 269/8.
- [11] OFEV (2015): " Sécurité sismique d'éléments de construction non-structuraux et d'autres installations et équipements", Publication OFEV, Berne. www.bafu.admin.ch/erdbeben.
- [12] SIA 267 (2013): Géotechnique, Norme Suisse SN 505 267, Société suisse des ingénieurs et architectes, Zurich.
- [13] Dastous J.-B. et Pierre J.-R. (2007), "Design Methodology for Flexible Buswork Between Substation Equipment Subjected to Earthquakes", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, n° 3, pp 1490–1497.
- [14] Dastous J.-B., Filiatrault A. et Pierre J.-R. (2004), "Estimation of Displacement at Interconnection Points of Substation Equipment Subjected to Earthquakes", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, n° 2, pp 618–628.

Annexe A : Zones sismiques selon SIA 261



Avec l'autorisation de la Société suisse des ingénieurs et architectes, Zurich.

Annexe B : Ancrage de transformateurs



ill. B.1: Transformateur 220 kV / 70 MVA – Zone sismique Z3b – Ancrages (8 pces. démontables) directement sur la fondation (avec l'autorisation d'axpo).



ill. B.2: Transformateur 236 kV / 60 MVA – Zone sismique Z3b – Cadre de renforcement soudé sur plaques d'ancrage coulées dans le béton (avec l'autorisation de ewz).



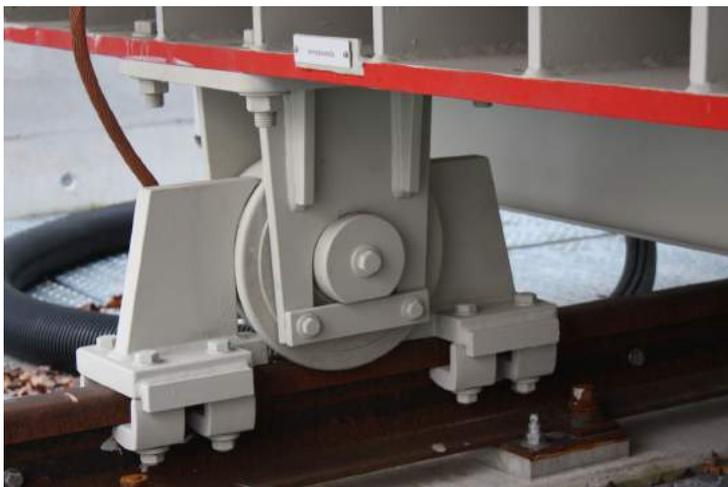
ill. B.3: Transformateur 110 kV / 60 MVA – Zone sismique Z2 – Ancrages (4 pces. démontables) avec roues (avec l'autorisation d'axpo).



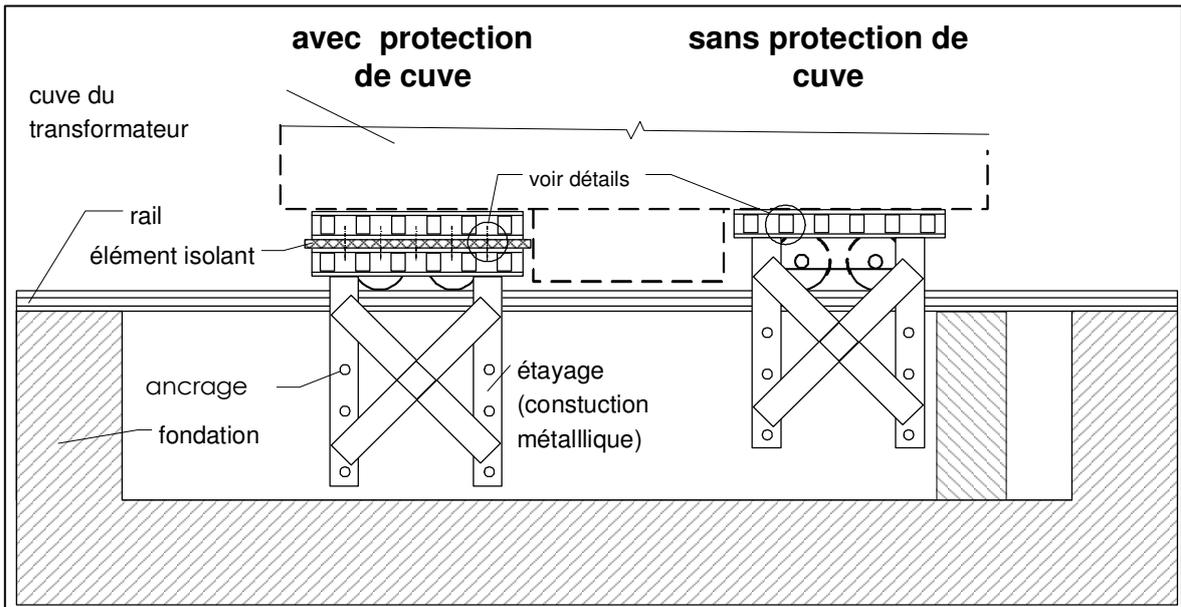
ill. B.4: Transformateur 110 kV / 125 MVA – Zone sismique Z2 – Ancrages (4 pcs. démontables) avec roues (avec l'autorisation d'axpo).



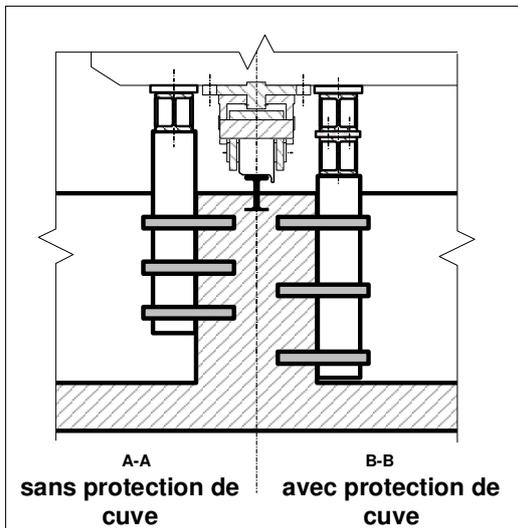
ill. B.5: Transformateur 50 kV / 25 MVA – Zone sismique Z2 – Ancrage sur une fondation existante renforcée (avec l'autorisation de energie thun).



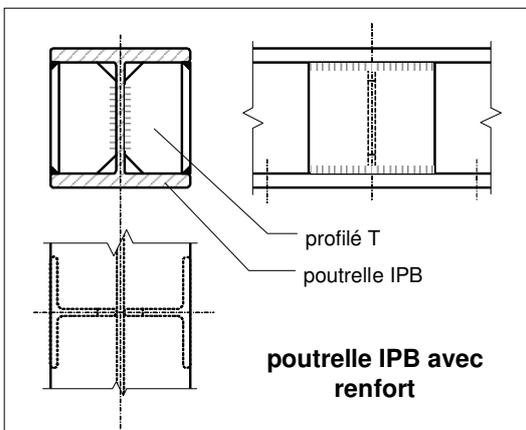
ill. B.6: Transformateur 110 kV / 40 MVA – Zone sismique Z1 – Ancrage au moyen de deux sabots d'arrêt par roue. Attention au flambage dans le sens transversal et à la stabilité du rail; UNIQUEMENT applicable en zone sismique Z1 (avec l'autorisation de ekz).



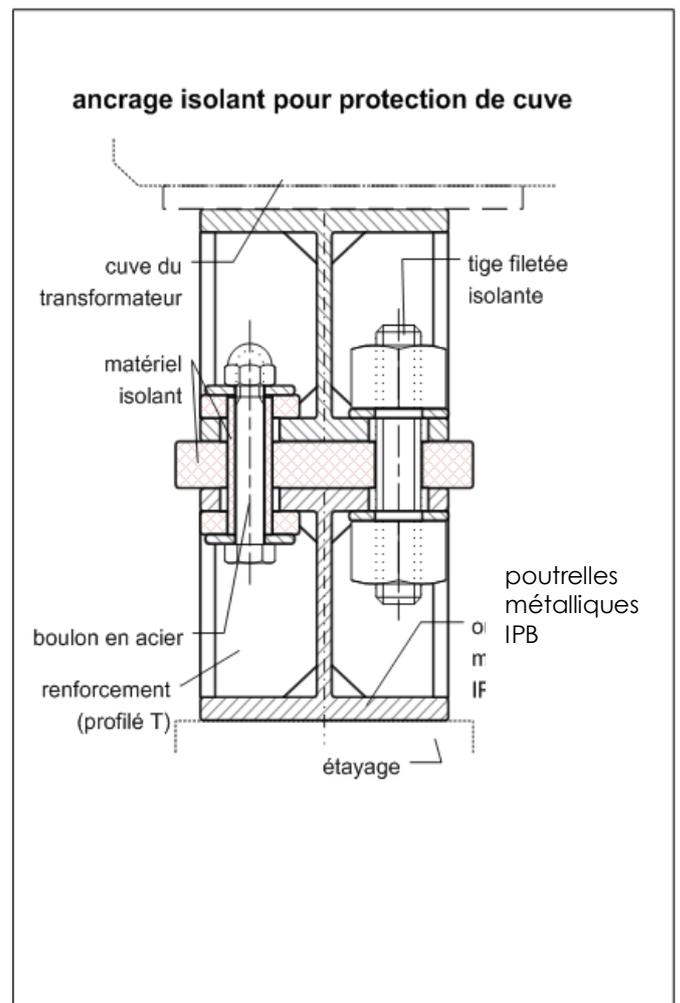
ill. B.7: Schéma d'un ancrage pour transformateurs sur rails



ill. B.8: détail de ill. B.7



ill. B.9 renfort de poutrelle



ill. B.10: possibilités pour un ancrage isolant

Annexe C : Explications complémentaires relatives au besoin de mou

Le mou nécessaire dans les connexions par câbles dépend, outre la configuration des conducteurs, en premier lieu des déplacements qui résultent aux points de raccordement des appareils reliés entre eux lors d'un tremblement de terre. Ce déplacement relatif dépend de son côté directement des déplacements des points de raccordement. Ce déplacement – appelé "besoin en déplacement" – dépend fortement de la fréquence propre fondamentale de l'appareil concerné, qui se situe généralement, avec des châssis de support standards, environ entre 2 et 4 Hz. La fréquence propre fondamentale est déterminante pour les vibrations en direction des connexions par câbles. Des supports porteurs flexibles ont une action défavorable dans la mesure où ils réduisent la fréquence propre fondamentale et donc augmentent considérablement le besoin en déplacement des points de raccordements des câbles.

Le mou nécessaire selon la norme US IEEE Std 693-2005 [9] est de $1,5 \Delta$ d'après l'équation (1), dans ce cas, Δ – particulièrement conservateur – devrait être calculé comme la somme des déplacements individuels. Mais la présente directive autorise à calculer Δ , à l'aide de la règle classique SRSS («Square Root of the Sum of Squares»), comme la racine carrée résultant de la somme des carrés des déplacements individuels. Ce règlement moins conservateur se base sur une publication de Dastous et Pierre [13], dont les résultats sont aussi intégrés dans la norme US IEEE Std 1527-2006 [8].

Les déplacements individuels des points de raccordements peuvent être déterminés, en cas de séisme, en fonction de la fréquence propre fondamentale de l'appareil, de la zone sismique et de la classe de sol de fondation, avec les moyens habituels du génie parasismique ; mais dans ce cas, il faut supposer un amortissement équivalent de 2 % de l'amortissement critique. Alors il est facile de calculer les valeurs pour Δ à partir de ces valeurs de déplacement, à l'aide de la règle SRSS.

Si aucun calcul sismique n'est fait, il est possible de reprendre approximativement pour " $1,5 \Delta$ " dans l'équation (1) les valeurs du tableau 8 respectivement 9, du côté sécuritaire dans la plupart des cas et valables pour la classe d'ouvrage III. Ces valeurs se basent sur le fait que les déplacements des points de raccordement ne dépendent pratiquement que de la vibration propre de l'appareil [14]. Les déplacements se déterminent donc directement à partir du facteur de participation et du déplacement spectral dépendant de la fréquence. Les valeurs du tableau 8 et 9 sont valables pour un facteur de participation supposé de 1,6, qui devrait couvrir environ 95 % des cas selon [8]. Cela n'est pas valable pour les traversées de transformateurs pour lesquelles, lors du calcul des déplacements de l'extrémité, des facteurs de participation de 3 à 4 peuvent résulter.

Les valeurs du tableau 8 et 9 se basent sur un amortissement de 2 %. De plus, les déplacements d'appareils qui résulteraient sans connexions par câbles sont admis, ce qui est du côté sécuritaire.

Annexe D : Feuille de calcul sismique

Feuille de calcul des forces d'ancrage et du besoin de mou _____ Date : _____ Page 1

Sous-station : Niveaux de tension : /

Requérant : Projet / Requête :

Action sismique

| | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|
| Zone sismique | Z1 | Z2 | Z3a | Z3b |
| Accélération du sol a_{gd} [m/s ²] | 0.6 | 1.0 | 1.3 | 1.6 |

| | | | | | | |
|--|-----|-----|------|------|-----|-------------------|
| Classe de sol de fon- dation ⁽¹⁾ | A | B | C | D | E | F |
| Facteur de sol de fondation S | 1.0 | 1.2 | 1.15 | 1.35 | 1.4 | -(²) |

⁽¹⁾ La classe de sol de fondation peut être déterminée à l'aide du tab. 24 de la norme SIA 261 ou à l'aide d'une carte de classes de sol de fondation dans la mesure où il en existe une (voir sous : <http://map.bafu.admin.ch>).

⁽²⁾ La classe de sol de fondation F nécessite une étude de site réalisée par un spécialiste.

| | | |
|--------------------------------------|-----|-----|
| Classe d'ouvrage (CO) ⁽³⁾ | II | III |
| Facteur d'importance γ_f | 1.2 | 1.4 |

⁽³⁾ Si la tension la plus élevée de la SS est égal ou supérieur à 220 kV, il faut obligatoirement classer la SS dans la CO III. Sinon, l'exploitant est libre de choisir la CO II ou III.

=> accélération du sol effective : $a_{gd} S \gamma_f = \dots\dots\dots$ [m/s²]

=> accélération spectrale effective⁽⁴⁾: $S_e = 3 a_{gd} S \gamma_f = \dots\dots\dots$ [m/s²]

⁽⁴⁾ A utiliser pour les transformateurs et appareils à haute tension dans la mesure où aucun examen plus détaillé n'existe quant à leur fréquence propre fondamentale ; les résultats sont toujours du côté sécuritaire. Sinon, déterminer S_e à l'aide de la norme SIA 261, paragraphe 16.2.

Remarques générale :

.....

.....

.....

.....

Timbre :

Forces d'ancrage pour transformateurs

Désignation du transfo :

Masse totale en exploitation m_{tot} : [t]

Hauteur du centre de gravité h_c : [m]

Distance horizontale minimale a_c : [m]

=> Degré d'élanement $s = h_c/a_c =$ [-]

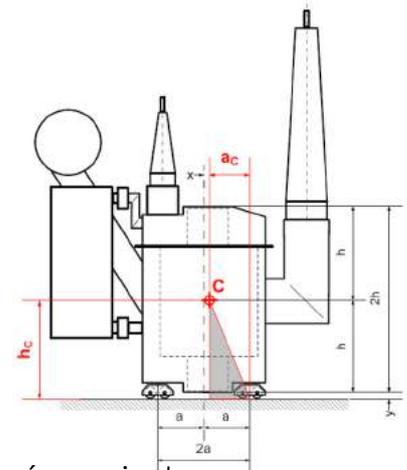
si $10 [m/s^2] / S_e^{(5)} < h_c/a_c$: sécurisation contre soulèvement nécessaire !

=> Sécurisation contre le soulèvement nécessaire: oui / non

Action sismique horizontale totale : $H = m_{tot} [t] S_e [m/s^2]^{(6)} =$ [kN]

Moment de basculement dû au séisme : $M = 1.2 h_c [m] H [kN]^{(6,7)} =$ [kNm]

Traction due à M ⁽⁸⁾: $Z = (M [kNm]/2a_c [m]) - (1/2 m_{tot} [t] 10 [kN/t]) =$ [kN]



⁽⁵⁾ Valeur calculée à la page 1.

⁽⁶⁾ Il s'agit de grandeurs élastiques ; dans les rapports relatifs à la résistance, si ces grandeurs sont utilisées, les valeurs de résistance du matériau peuvent être augmentées du facteur $q = 1.5$ (cf. chapitre 3.4).

⁽⁷⁾ Le facteur 1.2 tient compte approximativement du fait que le transformateur fait partiellement un mouvement de basculement, de sorte de que le point d'attaque de la force sismique totale se situe plus haut que le centre de gravité.

⁽⁸⁾ Traction verticale due au moment de basculement à ancrer de chaque côté. Tient compte de l'action sismique déstabilisante et du poids propre stabilisant (m_{tot} en tonnes, hypothèse: $g = 10 [m/s^2]$).

Forces d'ancrage pour appareils à haute tension

Désignation de l'appareil :

Masse totale en exploitation m_{tot} : [t]

Hauteur du centre de gravité h_c : [m] (conc. le pied de l'appareil)

Action sismique horizontale totale : $H = m_{tot} [t] S_e [m/s^2]^{(6)} =$ [kN]

Moment de basculement dû au séisme: $M = 1.2 h_c [m] H [kN]^{(6,7)} =$ [kNm]

⁽⁶⁾ Il s'agit de grandeurs élastiques ; dans les rapports relatifs à la résistance, si ces grandeurs sont utilisées, les valeurs de résistance du matériau peuvent être augmentées du facteur $q = 1.5$ (cf. chapitre 3.4).

⁽⁷⁾ Le facteur 1.2 tient compte approximativement du fait que le transformateur fait partiellement un mouvement de basculement, de sorte de que le point d'attaque de la force sismique totale se situe plus haut que le centre de gravité.

Remarques :

.....

Besoin de mou dans les câbles conducteurs (valable pour appareils 50 Hz)

Appareils reliés entre eux :

Appareil 1 : Appareil 2 :

Fréquences propres estimées $f_{0i}^{(9)}$: Appareil 1 : $f_{01} = \dots\dots$ [Hz]Appareil 2 : $f_{02} = \dots\dots$ [Hz]

- ⁽⁹⁾ Sans examen plus détaillé, si l'on utilise le tableau 8 de la directive ESTI, les valeurs supposées admissibles pour les fréquences propres sont les suivantes:
- disjoncteurs, transformateurs d'intensité de courant et de tension et groupes de mesure combinés: 2 Hz
 - isolateurs de support et sectionneurs de pantographes : 3 Hz
 - parafoudres et sectionneurs rotatifs : 4 Hz

Entrée dans le tableau 8 avec des paramètres d'entrée f_{01} , f_{02} , classe de sol de fondation et zone sismique:Mou nécessaire⁽¹⁰⁾ = $1.5 \Delta = \dots\dots\dots$ [mm]

- ⁽¹⁰⁾ Signification du mou nécessaire (1.5Δ) : il faut s'assurer que les points de raccordement des conducteurs puissent s'éloigner les uns des autres de cette grandeur avant que le câble conducteur ne se tende.

Attention : il faut contrôler l'admissibilité du mou nécessaire pour la configuration de conducteur donnée, p. ex. en ce qui concerne le respect des distances électriques minimales !

En cas de problème : changer la configuration de conducteur ou encore affiner la définition du besoin de mou à l'aide de calculs ou de mesures des fréquences propres fondamentales des appareils (cela donne souvent un besoin de mou plus faible).

Tableau 8 de la directive ESTI: besoin de mou nécessaire "1.5 Δ " pour la CO III ⁽¹¹⁾.

| Fréquences propres fondamentales des appareils f_{01} et f_{02} | Classe de sol de fondation | Zone Z1 1.5 Δ [mm] | Zone Z2 1.5 Δ [mm] | Zone Z3a 1.5 Δ [mm] | Zone Z3b 1.5 Δ [mm] |
|---|----------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 2 Hz – 2 Hz | A | 45 | 75 | 95 | 115 |
| | B, C | 65 | 110 | 140 | 170 |
| | D, E | 75 | 125 | 165 | 200 |
| 2 Hz – 3 Hz | A | 35 | 60 | 80 | 95 |
| | B, C | 50 | 85 | 110 | 135 |
| | D, E | 60 | 100 | 130 | 160 |
| 2 Hz – 4 Hz | A | 35 | 55 | 70 | 85 |
| | B, C | 50 | 80 | 105 | 125 |
| | D, E | 55 | 95 | 120 | 145 |
| 3 Hz – 3 Hz | A | 30 | 45 | 60 | 75 |
| | B, C | 35 | 55 | 70 | 90 |
| | D, E | 40 | 65 | 85 | 100 |
| 3 Hz – 4 Hz | A | 30 | 35 | 45 | 60 |
| | B, C | 30 | 45 | 55 | 70 |
| | D, E | 30 | 50 | 65 | 80 |

- ⁽¹¹⁾ – Pour la CO II, multiplier les valeurs du tableau par 0.85, sans descendre au-dessous de 30 mm
 – Pour les supports porteurs particulièrement hauts, majorer les valeurs du tableau de 20%

Besoin de mou dans les câbles conducteurs (valable pour appareils 16,7 Hz)

Appareils reliés entre eux :

Appareil 1 : Appareil 2 :

Fréquences propres estimées $f_{0i}^{(9)}$: Appareil 1 : $f_{01} = \dots$ [Hz]Appareil 2 : $f_{02} = \dots$ [Hz]

- ⁽⁹⁾ Sans examen plus détaillé, si l'on utilise le tableau 8 de la directive ESTI, les valeurs supposées admissibles pour les fréquences propres sont les suivantes:
- disjoncteurs, transformateurs d'intensité de courant et de tension et groupes de mesure combinés: 2,5 Hz
 - isolateurs de support et sectionneurs de pantographes : 3 Hz
 - parafoudres et sectionneurs rotatifs : 4 Hz

Entrée dans le tableau 9 avec des paramètres d'entrée f_{01} , f_{02} , classe de sol de fondation et zone sismique:Mou nécessaire⁽¹⁰⁾ = $1.5 \Delta = \dots$ [mm]

- ⁽¹⁰⁾ Signification du mou nécessaire (1.5Δ) : il faut s'assurer que les points de raccordement des conducteurs puissent s'éloigner les uns des autres de cette grandeur avant que le câble conducteur ne se tende.

Attention : il faut contrôler l'admissibilité du mou nécessaire pour la configuration de conducteur donnée, p. ex. en ce qui concerne le respect des distances électriques minimales !

En cas de problème : changer la configuration de conducteur ou encore affiner la définition du besoin de mou à l'aide de calculs ou de mesures des fréquences propres fondamentales des appareils (cela donne souvent un besoin de mou plus faible).

Tableau 9 de la directive ESTI: besoin de mou nécessaire "1.5 Δ " pour la CO II⁽¹¹⁾.

| Fréquences propres fondamentales des appareils f_{01} et f_{02} | Classe de sol de fondation | Zone Z1 1.5 Δ [mm] | Zone Z2 1.5 Δ [mm] | Zone Z3a 1.5 Δ [mm] | Zone Z3b 1.5 Δ [mm] |
|---|----------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 2,5 Hz – 2,5 Hz | A | 30 | 50 | 65 | 80 |
| | B, C | 40 | 60 | 80 | 95 |
| | D, E | 45 | 70 | 90 | 110 |
| 2,5 Hz – 3 Hz | A | 30 | 45 | 55 | 70 |
| | B, C | 35 | 55 | 70 | 85 |
| | D, E | 40 | 60 | 80 | 95 |
| 2,5 Hz – 4 Hz | A | 30 | 40 | 50 | 60 |
| | B, C | 30 | 45 | 60 | 75 |
| | D, E | 35 | 55 | 70 | 85 |
| 3 Hz – 3 Hz | A | 30 | 35 | 45 | 55 |
| | B, C | 30 | 45 | 55 | 65 |
| | D, E | 30 | 50 | 65 | 80 |
| 3 Hz – 4 Hz | A | 30 | 30 | 40 | 45 |
| | B, C | 30 | 35 | 45 | 55 |
| | D, E | 30 | 40 | 55 | 65 |

- ⁽¹¹⁾ – Pour les supports porteurs particulièrement hauts, majorer les valeurs du tableau de 20%

Feuille de calcul sismique – exemple rempli (page 1)

Annexe D : Feuille de calcul sismiqueFeuille de calcul des forces d'ancrage et du besoin de mou Date : **14.5.2013** Page 1Sous-station : **Baiken (SG)** Niveaux de tension : **380 / 220 kV**Requérant : **ewz** Projet / Requête : **xyz****Action sismique**

| | | | | |
|--|-----|------------|-----|-----|
| Zone sismique | Z1 | Z2 | Z3a | Z3b |
| Accélération du sol a_{gd} [m/s ²] | 0.6 | 1.0 | 1.3 | 1.6 |

| | | | | | | |
|---|-----|-----|------|-------------|-----|------------------|
| Classe de sol de fondation ⁽¹⁾ | A | B | C | D | E | F |
| Facteur de sol de fondation S | 1.0 | 1.2 | 1.15 | 1.35 | 1.4 | – ⁽²⁾ |

⁽¹⁾ La classe de sol de fondation peut être déterminée à l'aide du tab. 24 de la norme SIA 261 ou à l'aide d'une carte de classes de sol de fondation dans la mesure où il en existe une (voir sous : <http://map.bafu.admin.ch>).

⁽²⁾ La classe de sol de fondation F nécessite une étude de site réalisée par un spécialiste.

| | | |
|--------------------------------------|-----|------------|
| Classe d'ouvrage (CO) ⁽³⁾ | II | III |
| Facteur d'importance γ_f | 1.2 | 1.4 |

⁽³⁾ Si la tension la plus élevée de la SS est égal ou supérieur à 220 kV, il faut obligatoirement classer la SS dans la CO III. Sinon, l'exploitant est libre de choisir la CO II ou III.

=> accélération du sol effective : $a_{gd} S \gamma_f = \dots \dots \dots$ **1.89** $[m/s^2]$

=> accélération spectrale effective⁽⁴⁾: $S_e = 3 a_{gd} S \gamma_f = \dots \dots \dots$ **5.67** $[m/s^2]$

⁽⁴⁾ A utiliser pour les transformateurs et appareils à haute tension dans la mesure où aucun examen plus détaillé n'existe quant à leur fréquence propre fondamentale ; les résultats sont toujours du côté sécuritaire. Sinon, déterminer S_e à l'aide de la norme SIA 261, paragraphe 16.2.

Remarques générale : **supports porteurs hauts**
en raison du risque d'inondation

Timbre :

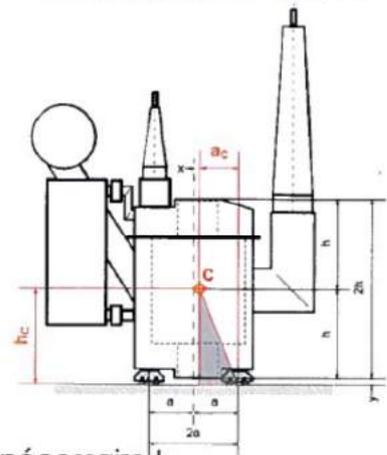
Feuille de calcul sismique – exemple rempli (page 2)

Feuille de calcul des forces d'ancrage et du besoin de mou

Date: 14.5.2013 Page 2

Forces d'ancrage pour transformateurs

Désignation du transfo : ... XY 1000 MVA

Masse totale en exploitation m_{tot} : ... 160 [t]Hauteur du centre de gravité h_c : ... 2.4 (estimé) [m]Distance horizontal minimale a_c : ... 0.72 [m]=> Degré d'élanement $s = h_c/a_c = \sim 3.3$ [-]si $10 [m/s^2] / S_e^{(5)} < h_c/a_c$: sécurisation contre soulèvement nécessaire !=> Sécurisation contre le soulèvement nécessaire: **oui** / nonAction sismique horizontale totale : $H = m_{tot} [t] S_e [m/s^2]^{(6)} = \sim 910$ [kN]Moment de basculement dû au séisme : $M = 1.2 h_c [m] H [kN]^{(6,7)} = 2.600$ [kNm]Traction due à M ⁽⁸⁾: $Z = (M [kNm] / 2a_c [m]) - (1/2 m_{tot} [t] 10 [kN/t]) = \sim 1.000$ [kN]⁽⁵⁾ Valeur calculée à la page 1.⁽⁶⁾ Il s'agit de grandeurs élastiques ; dans les rapports relatifs à la résistance, si ces grandeurs sont utilisées, les valeurs de résistance du matériau peuvent être augmentées du facteur $q = 1.5$ (cf. chapitre 3.4).⁽⁷⁾ Le facteur 1.2 tient compte approximativement du fait que le transformateur fait partiellement un mouvement de basculement, de sorte de que le point d'attaque de la force sismique totale se situe plus haut que le centre de gravité.⁽⁸⁾ Traction verticale due au moment de basculement à ancrer de chaque côté. Tient compte de l'action sismique déstabilisante et du poids propre stabilisant (m_{tot} en tonnes, hypothèse: $g = 10 [m/s^2]$).**Forces d'ancrage pour appareils à haute tension**

Désignation de l'appareil : ... transformateur d'intensité de courant xy 220 kV

Masse totale en exploitation m_{tot} : ... 1.0 [t]Hauteur du centre de gravité h_c : ... 3.57 [m] (conc. le pied de l'appareil)Action sismique horizontale totale : $H = m_{tot} [t] S_e [m/s^2]^{(6)} = \sim 5.67$ [kN]Moment de basculement dû au séisme: $M = 1.2 h_c [m] H [kN]^{(6,7)} = 24.3$ [kNm]⁽⁶⁾ Il s'agit de grandeurs élastiques ; dans les rapports relatifs à la résistance, si ces grandeurs sont utilisées, les valeurs de résistance du matériau peuvent être augmentées du facteur $q = 1.5$ (cf. chapitre 3.4).⁽⁷⁾ Le facteur 1.2 tient compte approximativement du fait que le transformateur fait partiellement un mouvement de basculement, de sorte de que le point d'attaque de la force sismique totale se situe plus haut que le centre de gravité.

Remarques :

.....

.....

Feuille de calcul sismique – exemple rempli (page 3)

Feuille de calcul des forces d'ancrage et du besoin de mou

Date : 14.5.2013 Page :**Besoin de mou dans les câbles conducteurs** (valable pour appareils 50 Hz)

Appareils reliés entre eux :

Appareil 1 : isolateur de support Appareil 2 : disjoncteurFréquences propres estimées $f_{01}^{(9)}$: Appareil 1 : $f_{01} = \underline{3}$ [Hz]Appareil 2 : $f_{02} = \underline{2}$ [Hz]⁽⁹⁾ Sans examen plus détaillé, si l'on utilise le tableau 8 de la directive ESTI, les valeurs supposées admissibles pour les fréquences propres sont les suivantes:

- disjoncteurs, transformateurs d'intensité de courant et de tension et groupes de mesure combinés: 2 Hz
- isolateurs de support et sectionneurs de pantographes : 3 Hz
- parafoudres et sectionneurs rotatifs : 4 Hz

Entrée dans le tableau 8 avec des paramètres d'entrée f_{01} , f_{02} , classe de sol de fondation et zone sismique:Mou nécessaire⁽¹⁰⁾ = $1.5 \Delta = \underline{12 \cdot 100 = 120}$ [mm]⁽¹⁰⁾ Signification du mou nécessaire (1.5Δ): il faut s'assurer que les points de raccordement des conducteurs puissent s'éloigner les uns des autres de cette grandeur avant que le câble conducteur ne se tende.**Attention : il faut contrôler l'admissibilité du mou nécessaire pour la configuration de conducteur donnée, p. ex. en ce qui concerne le respect des distances électriques minimales !**

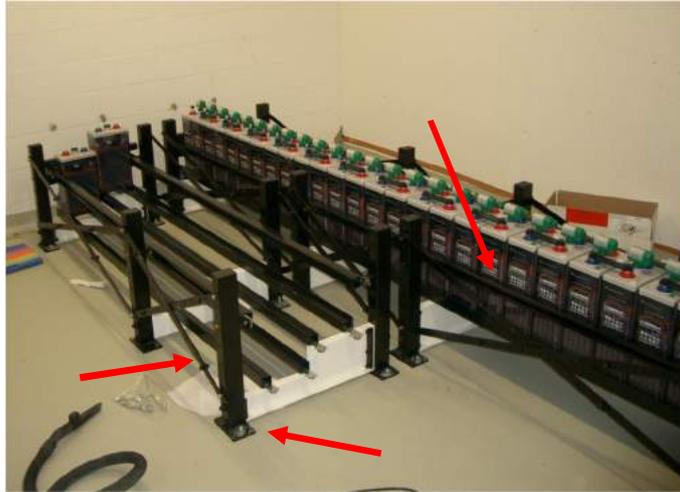
En cas de problème : changer la configuration de conducteur ou encore affiner la définition du besoin de mou à l'aide de calculs ou de mesures des fréquences propres fondamentales des appareils (cela donne souvent un besoin de mou plus faible).

Tableau 8 de la directive ESTI: besoin de mou nécessaire "1.5 Δ " pour la CO III⁽¹¹⁾.

| Fréquences propres fondamentales des appareils f_{01} et f_{02} | Classe de sol de fondation | Zone Z1 1.5 Δ [mm] | Zone Z2 1.5 Δ [mm] | Zone Z3a 1.5 Δ [mm] | Zone Z3b 1.5 Δ [mm] |
|---|----------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 2 Hz – 2 Hz | A | 45 | 75 | 95 | 115 |
| | B, C | 65 | 110 | 140 | 170 |
| | D, E | 75 | 125 | 165 | 200 |
| 2 Hz – 3 Hz | A | 35 | 60 | 80 | 95 |
| | B, C | 50 | 85 | 110 | 135 |
| | D, E | 60 | <u>100</u> | 130 | 160 |
| 2 Hz – 4 Hz | A | 35 | 55 | 70 | 85 |
| | B, C | 50 | 80 | 105 | 125 |
| | D, E | 55 | 95 | 120 | 145 |
| 3 Hz – 3 Hz | A | 30 | 45 | 60 | 75 |
| | B, C | 35 | 55 | 70 | 90 |
| | D, E | 40 | 65 | 85 | 100 |
| 3 Hz – 4 Hz | A | 30 | 35 | 45 | 60 |
| | B, C | 30 | 45 | 55 | 70 |
| | D, E | 30 | 50 | 65 | 80 |

⁽¹¹⁾ – Pour la CO II, multiplier les valeurs du tableau par 0.85, sans descendre au-dessous de 30 mm– Pour les supports porteurs particulièrement hauts, majorer les valeurs du tableau de 20%

Annexe E : Exemples de sécurisation d'éléments non-structuraux



- ill. E.1 *Protection contre le basculement et la chute de batteries de secours dans la SS Münchwilen (Axpo SA) : les pieds du support sont entretoisés en diagonale et boulonnés au sol ; les profils horizontaux empêchent le basculement des batteries.*



- ill. E.2 *SS Münchwilen (Axpo SA): l'intercalation de plastiques ondulés entre des batteries voisines les empêchent de s'entrechoquer.*



ill. E.3/E.4: Sécurisation d'armoires de commande avec équerres contre le mur (axpo AG)



ill. E.5: Sécurisation d'armoires de commande par câbles (Organisation en cas de crise canton Bâle-ville)



ill. E.6/E.7: Sécurisation d'armoires de commande au centre d'une pièce jusqu'au mur (axpo AG)

Annexe F: Convention d'utilisation

Introduction

Une conception parasismique présuppose des exigences claires du maître de l'ouvrage ainsi qu'une collaboration suffisamment tôt entre les planificateurs pertinents. Selon le règlement SIA 112 (2014), la définition du projet et le cahier des charges du projet permettent de clarifier le mieux possible et en temps voulu les objectifs que poursuit le maître de l'ouvrage et de définir les exigences applicables à l'ouvrage.

La convention d'utilisation fait partie du cahier des charges du projet et fixe les exigences d'utilisation du maîtres de l'ouvrage (voir SIA 260). La convention d'utilisation est établie sur la base d'un dialogue entre le maître de l'ouvrage et les projeteurs. Le maître de l'ouvrage est responsable d'intégrer le thème de la sécurité sismique dans le cahier des charges du projet dans la phase 2 „Etudes préliminaires“ et de fixer les exigences quant à la structure porteuse ainsi qu'aux éléments de construction non-structuraux, aux installations et autres équipements. Les prestations correspondantes des professionnels spécialisés doivent être décrites dans les appels d'offres en fonction du projet. Selon la norme SIA 103 (2014), la convention d'utilisation est à établir sur la base du cahier des charges du projet dans la phase 31 „Avant-projet“ et à approuver par le mandant. De plus, la convention d'utilisation doit être actualisée en fonction de l'avancement du projet et si nécessaire être approuvée à nouveau à l'achèvement de chaque phase partielle.

Aspects pertinents

Pour un usage de la convention d'utilisation opportun et adéquat aux phases du projet, les aspects généraux suivants sont importants : Etat (phase de projet, statut, version, modifications, autorisation, distributeurs,...), références (directive ESTI), description du projet de construction, signatures (maître de l'ouvrage, directeur général du projet, ingénieur civil, autres projeteurs,...).

Pour les installations de la distribution d'énergie les aspects suivants sont pertinents pour le respect des dispositions de la présente directive et doivent être définis dans la convention d'utilisation (à compléter en fonction du projet selon l'aléa et l'importance):

- classe d'ouvrage (motif selon directive ESTI), zone sismique, sol de fondation (classe de sol de fondation, examens géotechniques ou microzonage sismique)
- concept parasismique ainsi que mesures constructives et relatives à la conception (y c. plan et élévation schématique avec les éléments stabilisants)
- Eléments de construction non structuraux, installations et équipements : définition des éléments pertinents y c. motifs ainsi que définition des responsabilités relatives au dimensionnement, à l'appel d'offres, au contrôle et à la réception des travaux (par ex. à l'aide d'un tableau des mesures et des responsabilités)
- Pour les classes d'ouvrage III, exigences concrètes quant à l'aptitude au service afin de garantir le fonctionnement après un séisme (pour le bâtiment et les éléments pertinents du système global)

Dans le cas de projet d'extension, de transformation ou de réfection d'installations existantes, des réflexions plus poussées sont nécessaires pour définir les exigences et les principes de base selon les normes SIA 269 ss. (resp. SIA 269/8) sur la maintenance des structures porteuses.

Des aspects complémentaires sont à définir dans la base de projet ou dans des rapports.